干旱区研究
ARID ZONE RESEARCH

doi:10.13866/j.azr.2019.03.10

基于 Ripley's K(r) 函数的荒漠锦鸡儿种群分布格局①

刘旻霞， 夏素娟， 南笑宁， 李全弟， 蒋晓轩
（西北师范大学地理与环境科学学院，甘肃 兰州 730070）

摘 要：运用点格局分析法中的 Ripley K 函数，对甘肃中部地区的皋兰县老虎台不同坡向的典型植被荒漠锦鸡儿（*Caragana roborovskyi*）种群不同龄级的空间格局及其关联性进行分析。结果表明：荒漠锦鸡儿Ⅰ、Ⅱ级种群在整个种群中占优势，种群更新状况较好，属增长型种群。在北坡，Ⅰ级荒漠锦鸡儿种群在整个研究尺度内呈聚集分布状态，Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ级种群呈随机分布状态；在西北坡，Ⅰ级种群呈明显聚集分布，Ⅱ级在小尺度聚集分布，大尺度呈随机分布状态，Ⅲ、Ⅳ级种群在任何尺度均表现为随机分布状态；在西南坡，所有龄级的荒漠锦鸡儿在各个尺度内均呈随机分布状态。不同坡向，Ⅰ、Ⅱ级种群在小尺度表现为负相关，随尺度增加最终呈不相关状态，Ⅲ、Ⅳ级在整个研究尺度内均为不相关，其他龄级种群之间均为负相关状态。荒漠锦鸡儿种群的自然更新不仅受种间、种内竞争的影响，同时也与不同坡向的生境状况有关。在甘肃中部干旱区采用荒漠锦鸡儿对水土流失地进行恢复重建时，灌木间的株行距在西南坡、南坡以 4 m 为宜；在西北坡、北坡以 3 m 为宜。

关键词：坡向；荒漠锦鸡儿；种群；空间格局；关联性；甘肃中部

植物种群空间结构是种群内不同个体数量多少的分布情况，它既可以反映种群个体的资源配置方式，也能反映种群数量动态的变化、种群的发展趋势以及它们与环境之间的相互关系[1-2]。处于不同生境下的植物种群个体也在不断的变化之中，种群个体会随时间、地点和对环境空间的占据能力及其年龄大小产生较大的差异，并因此而影响植物种群内种子的分布、萌发和幼小个体的更新[3]。空间关联性是指同一物种的不同个体或不同物种个体在空间上的联结性，体现了群落的形成和演化机制[4]。开展种群空间格局的研究，有助于了解种群在不同生境中的相互关系、相互作用以及与环境之间的关系，预测群落消长动态，揭示群落演替的内在机制。张璞进等[5]对内蒙古灌丛化草原毛刺锦鸡儿（*Caragana tibetica*）种群结构和空间分布格局进行了研究，确定了内蒙古地区生态恢复重建时其种群的合理密植数；梅军林等[6]对桂林喀斯特地区的红背山麻杆（*Alchornea trewioides*）种群的点格局进行了研究，表明喀斯特地区红背山麻杆主要选择克隆繁殖方式，以利于其有效利用资源，迅速开拓新生境，扩大种群，形成单优势种的立地；刘旻霞[7]对亚高寒草甸不同坡向金露梅（*Potentilla fruticosa*）种群的空间分布格局及空间关联也做了相应的研究，表明微气候生境对种群分布的影响。而对甘肃省皋兰县水阜乡老虎台的荒漠锦鸡儿种群空间分布及关联性的研究还较鲜见。

荒漠锦鸡儿是一种强旱生矮灌木，高 0.3 ~ 1 m，直立或外倾，由基部多分枝。主要分布于荒漠草原，草原化荒漠中。有时也进入荒漠，在荒漠地带，仅生长在水分条件比较好的局部生境中。荒漠锦鸡儿由于其喜光，耐干旱、贫瘠、耐寒，且有极强的防风固沙、保护水土以及改良土壤的作用。在干旱、半干旱区，锦鸡儿灌丛通常呈斑块状分布，土壤养分会在灌丛下富集，形成灌丛的“肥岛效应”[8]。研究荒漠锦鸡儿的群落结构、种群个体分布，并探讨其适应干旱荒漠环境的机制，具有很高的生态价值和经济价值。部分学者已经对荒漠锦鸡儿进行了大量的研究，主要集中在叶片形态结构[9]、植物水力结构[10]、抗旱性[11]和种子萌发[12]等方面，然而关于荒漠锦鸡儿种群不同坡向及不同龄级的分布格局和

① 收稿日期：2018-08-05； 修订日期：2018-11-16
基金项目：国家自然科学基金项目（31760135，31360114）资助
作者简介：刘旻霞（1972-），女，博士，教授，研究方向为寒旱区环境恢复生态学. E-mail：xiaminl@163.com

空间关系的研究尚不多见。本文运用点格局分析方法中的 Ripley's K 函数对黄土高原沟壑区荒漠锦鸡儿种群的空间分布格局及种间关联性进行分析,以期为黄土高原干旱荒漠区锦鸡儿种群的配置、合理密植、群落的稳定性及其保育措施提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究设在兰州市皋兰县水阜乡水阜村的老虎台(图 1),地处陇中北部黄土丘陵区,该区属温带大陆性气候,水土流失与干旱并存、荒漠化与盐渍化同在,地区自然灾害频繁。区内海拔在 1 715 ~ 1 935 m,坡度在 15° ~ 40°。年平均降雨量为 263 mm,年际年内降水变率大,70% 的降雨分布在 6—9 月,最大年降雨量为 392 mm,最小年降雨量为 154.9 mm;年蒸发量为 1 500 mm,是降雨量的 5 倍多。年平均日照时数 2 768.1 h,无霜期 157 ~ 182 d。年平均气温为 8.7 ℃,年均最低气温为 -9.1 ℃;年均最高气温 20.7 ℃。年平均风速为 2.0 $m \cdot s^{-1}$,年平均沙尘暴日数 2.6 d。土壤以淡灰钙土为主,轻壤质地,团粒结构松散,持水保肥能力差。该区天然植被属典型草原向荒漠草原过渡类型。坡向差异造成阴阳坡水热条件差异,呈现出阴阳坡分异的荒漠草原景观。主要植被有旱生小灌木红砂(*Reaumuria songarica*)、荒漠锦鸡儿、少量分布有蝎虎驼蹄瓣(*Zygophyllum mucronatum*)、骆驼蓬(*Peganum harmala*)等多年生植物,伴生有一年生狗尾草(*Setaria viridis*)、冠芒草(*Enneapogon borealis*)、棒头草(*Polypogon fugax*)等草本植物,植被盖度 15% ~60% 不等。

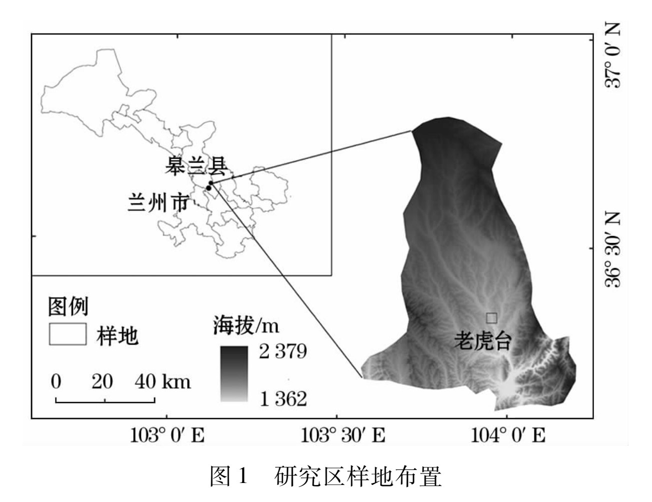


图 1 研究区样地布置

Fig. 1 Distribution of the sample plots in the study area

1.2 实验设计与方法

2017 年 7 月下旬到 8 月初在皋兰县水阜乡老虎台进行野外调查。在山体的中上部,用 GPS 在北坡、西北坡及西南坡 3 个坡向同海拔高度选取样地,在每个样地分别设置 10 m × 10 m 的研究样方,采用相邻格子法把此样方划分为 100 个 1 m × 1 m 的小样方,在每一个小样方中,以其左下角为基点,通过坐标确定荒漠锦鸡儿灌丛的相对位置,在坐标纸上记录小样方中每个锦鸡儿的投影点,并测定其冠幅、高度及其他生物特征等信息。

1.3 研究方法

1.3.1 *锦鸡儿径级的确定* Wiegand 等[13]研究指出,植物生长的大小可以很好地指示灌木的发育阶段,在干旱环境中,灌木的冠幅与高度之间的关系和灌木的发育阶段呈显著的正相关关系[14]。本文通过分析荒漠锦鸡儿的株高、地径、冠幅以及不同冠幅区间内荒漠锦鸡儿的数量特征来确定荒漠锦鸡儿种群内个体的发育阶段,进而分析种群结构[15]。

1.3.2 *点格局分析* 基于种群的二维点坐标分布信息,运用点格局分析法中的 Ripley K 函数[16],对荒漠锦鸡儿种群在不同坡向的空间分布格局进行分析。单变量 $K(t)$ 函数公式如下:

$$K(t) = \frac{A}{n^2}\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\frac{It(u_{ij})}{W_{ij}}, (i \neq j) \quad (1)$$

式中:A 为测定面积;n 为测定区内植物个体总数;u_{ij} 为 i 与 j 之间的间距;t 表示空间尺度,当 $u_{ij} \leq t$ 时,$It(u_{ij}) = 1$,当 $u_{ij} > t$ 时,$It(u_{ij}) = 0$;W_{ij} 是圆周长在 A 面积中的比例。

为了使结果更可靠,方差更稳定,通常引入 K/π 的平方根对 $K(t)$ 函数进行修正,得出了 $L(t)$ 函数,公式如下:

$$L(t) = \sqrt{K(t)/\pi} - t \quad (2)$$

若 $L(t) = 0$,则种群为随机分布;若 $L(t) > 0$,则种群为聚集分布;若 $L(t) < 0$ 时,则种群为均匀分布。

1.3.3 *空间关联分析* 荒漠锦鸡儿种群的空间关联性,采用 Ripley K 函数转换的双变量函数进行分析,双变量函数公式如下:

$$K_{12}(t) = \frac{A}{n_1 \cdot n_2}\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\frac{It(u_{ij})}{W_{ij}}, (i \neq j) \quad (3)$$

式中:n_1、n_2 分别代表种群 1 及种群 2 的个体数,其

他指标与式(1)含义相同,此时 i 和 j 则表示种群 1 及种群 2 的个体,同样,为了结果更可靠,方差更稳定,修正后的函数为:

$$L_{12}(t) = \sqrt{K_{12}(t)/\pi} - t \tag{4}$$

当 $L_{12}(t) > 0$ 时,表示不同龄级个体在 t 范围正关联;当 $L_{12}(t) = 0$ 时,不同龄级个体在 t 范围没有显著相关性;当 $L_{12}(t) < 0$ 时,不同龄级个体在 t 范围负关联。

通常用 Monte-Carlo 方法[17]来计算空间分布的上下包迹线,从而形成 $L(t)$ 及 $L_{12}(t)$ 的置信区间。通过野外实测数据对不同范围的 $L(t)$ 及 $L_{12}(t)$ 值进行计算,通过判断其与包迹线的位置关系来判定分布格局及关联性。

1.4 数据处理

数据过程采用 Get Data Graph Digitizer 2.25 软件进行坐标提取,通过 Excel 2010、Programita 2014 等软件进行数据分析。本研究选取的尺度空间为 5 m,采用 Monte Carlo 拟合检验随机模拟 999 次计算上下包迹线,置信区间为 99%,采用 Sigmaplot 13.0 绘图。

2 结果与分析

2.1 不同坡向荒漠锦鸡儿种群结构特征

图 2 为调查样方中荒漠锦鸡儿个体的分布图。本研究中共调查到 808 株荒漠锦鸡儿,总盖度为 6.75%。最大冠幅为 95 cm × 80 cm,最小为 22 cm×17 cm。由此可见,锦鸡儿不同龄级个体的分布差异较大。

从图 3a 可见,荒漠锦鸡儿冠幅的长与宽之间具有显著的正相关关系,图 3b 则显示荒漠锦鸡儿冠幅与高度的相关关系。从图 3b 可以看出,随着冠幅的增加,荒漠锦鸡儿的高度呈现出先增加后趋于平缓的稳定趋势。

根据以上分析可将荒漠锦鸡儿划分为 4 个龄级,龄级的划分是根据冠幅和地径来确定。Ⅰ级(地径 < 0.85 cm,冠幅 < 20 cm)、Ⅱ级(地径 0.85 ~ 1.47 cm,

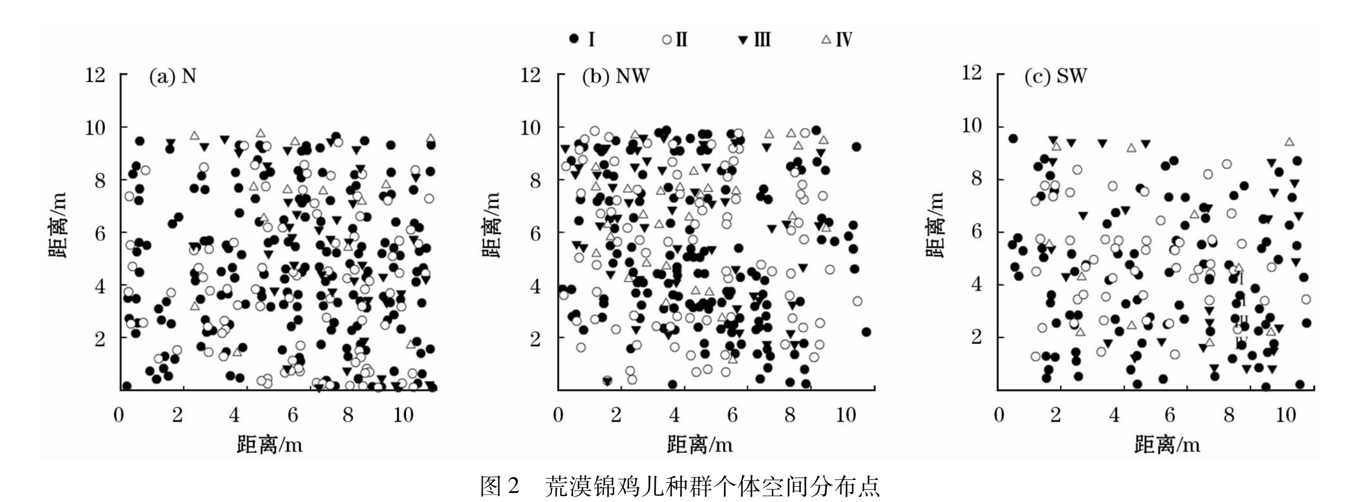


图 2 荒漠锦鸡儿种群个体空间分布点

Fig. 2 Spatial distribution of individuals of *Caragana roborovskyi* population

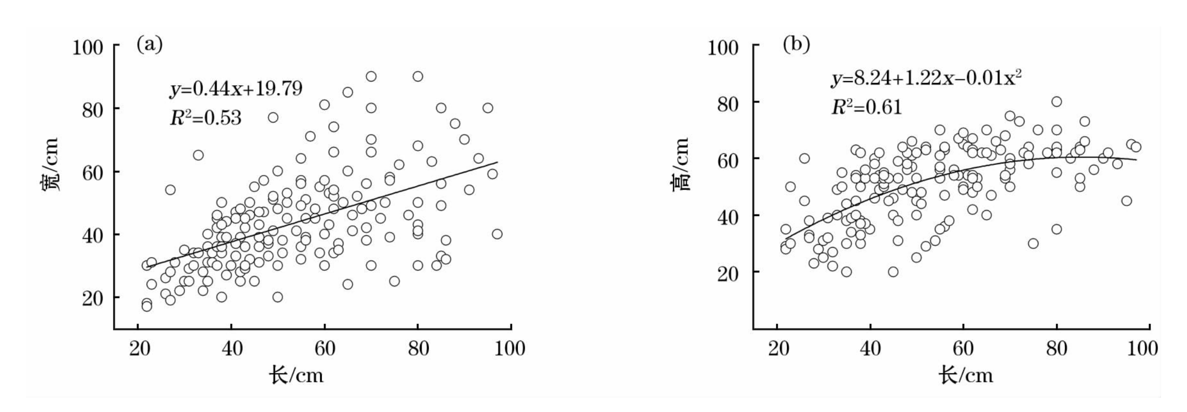


图 3 荒漠锦鸡儿冠幅长与宽、高的关系

Fig. 3 The relationships among the canopy length, width and height of *Caragana roborovskyi*

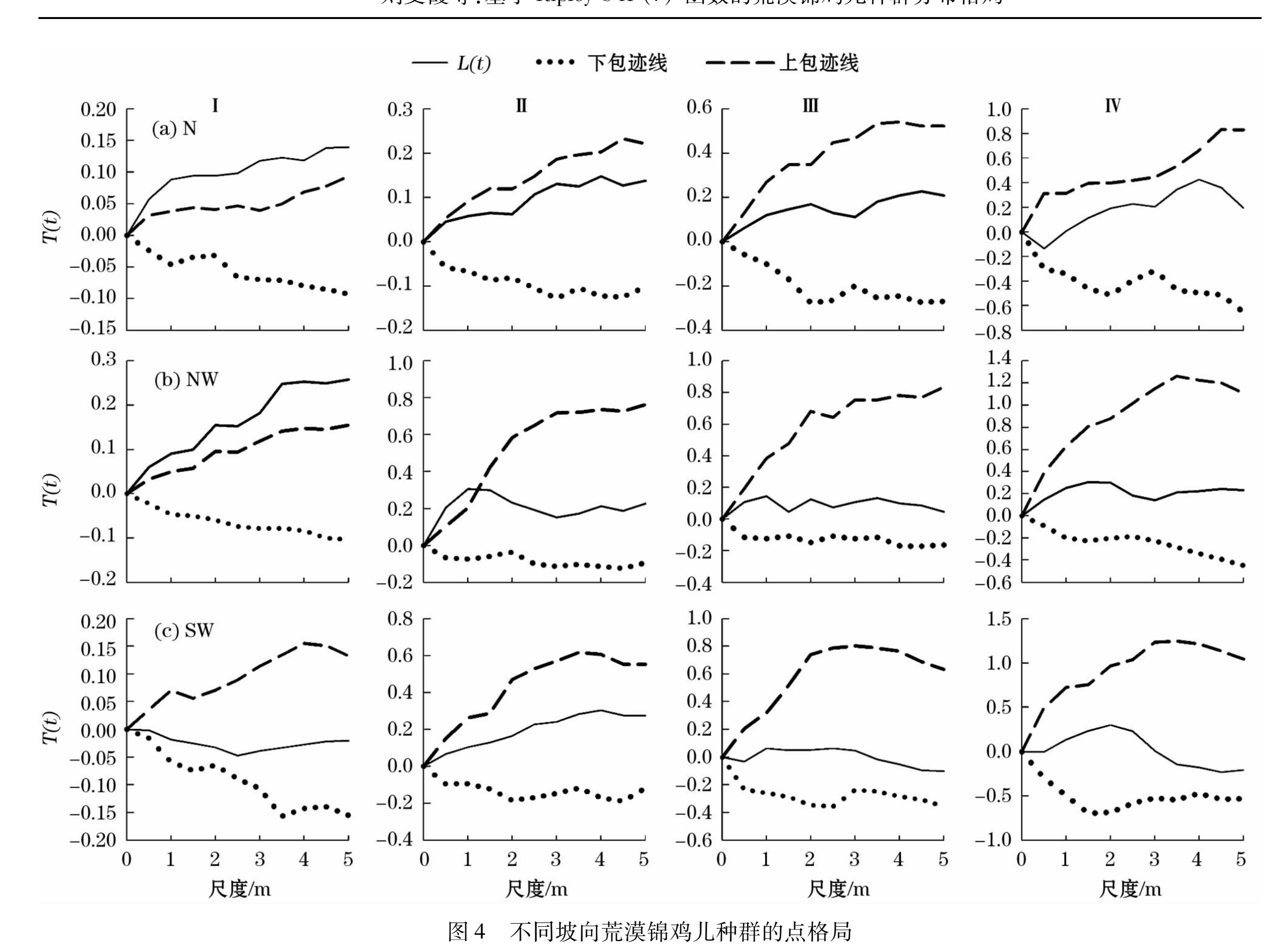


图 4　不同坡向荒漠锦鸡儿种群的点格局

Fig. 4　Point patterns of *Caragana roborovskyi* population at different slope aspects

冠幅为 20 ~ 60 cm)、Ⅲ级(地径 1.47 ~ 2.05 cm,冠幅为 60 ~ 90 cm)和Ⅳ级(地径 > 2.05 cm,冠幅 > 90 cm)。根据调查的种群个体龄级数显示,荒漠锦鸡儿Ⅰ级有 320 株,Ⅱ级 336 株,Ⅲ级 90 株,Ⅳ级 62 株,据此判断荒漠锦鸡儿种群为增长型种群。

2.2　不同龄级荒漠锦鸡儿种群的点格局

从图 4 可见,在北坡、西北坡和西南坡 3 个坡向上,荒漠锦鸡儿个体的分布状况明显不同。各个龄级的荒漠锦鸡儿灌丛在西南坡上均表现为随机分布;北坡坡向上Ⅰ级荒漠锦鸡儿灌丛在 0 ~ 5 m 范围均表现为明显的聚集分布,且聚集程度比较高,随着年龄的增长,其分布情况发生改变,Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ 级锦鸡儿在 0 ~ 5 m 内均为随机分布;西北坡Ⅰ级荒漠锦鸡儿在 0 ~ 5 m 内均为聚集分布,Ⅱ级在 0 ~ 1.3 m 尺度聚集分布,在 1.3 ~ 5 m 呈随机分布状态,Ⅲ、Ⅳ级在任何尺度均表现为随机分布状态;西南坡的所有龄级锦鸡儿在 0 ~ 5 m 内都呈随机分布。

2.3　不同龄级荒漠锦鸡儿种群空间相关性

在北坡,Ⅰ和Ⅱ级荒漠锦鸡儿种群在 0 ~ 3.3 m 尺度上表现为显著的负相关,3.3 m 之后相关性降低,随着尺度增加最终至无关联;Ⅰ和Ⅲ级、Ⅰ和Ⅳ级及Ⅱ和Ⅲ级荒漠锦鸡儿种群在所有尺度内表现为负相关;Ⅱ和Ⅳ级荒漠锦鸡儿种群在 0 ~ 2.9 m 范围为负相关,2.9 ~ 5 m 范围无关联;Ⅲ和Ⅳ级荒漠锦鸡儿在所有尺度上均表现为无关。在西北坡,Ⅰ和Ⅱ级荒漠锦鸡儿在 0 ~ 3 m 范围内为显著负相关,3 ~ 5 m 尺度上则转为无相关;Ⅰ和Ⅲ、Ⅰ和Ⅳ、Ⅱ和Ⅲ级及Ⅱ和Ⅳ级荒漠锦鸡儿在研究尺度内均表现为负相关;Ⅲ和Ⅳ级荒漠锦鸡儿在各尺度内表现为无关。在西南坡,Ⅰ和Ⅱ级荒漠锦鸡儿在 0 ~ 3.2 m 尺度上表现为显著的负相关,3.2 ~ 5 m 尺度内为无关;Ⅰ和Ⅲ级、Ⅰ和Ⅳ、Ⅱ和Ⅲ及Ⅱ和Ⅳ荒漠锦鸡儿在研究尺度内均表现为负相关,Ⅲ和Ⅳ级荒漠锦鸡儿在各尺度无关(图 5)。总体而言,各级荒漠锦鸡儿个体之间的相关性在各个坡向上大致相同,仅有个别小尺度上表现出差异性,表明荒漠锦鸡儿种群对坡向微地形变化表现出的响应策略。

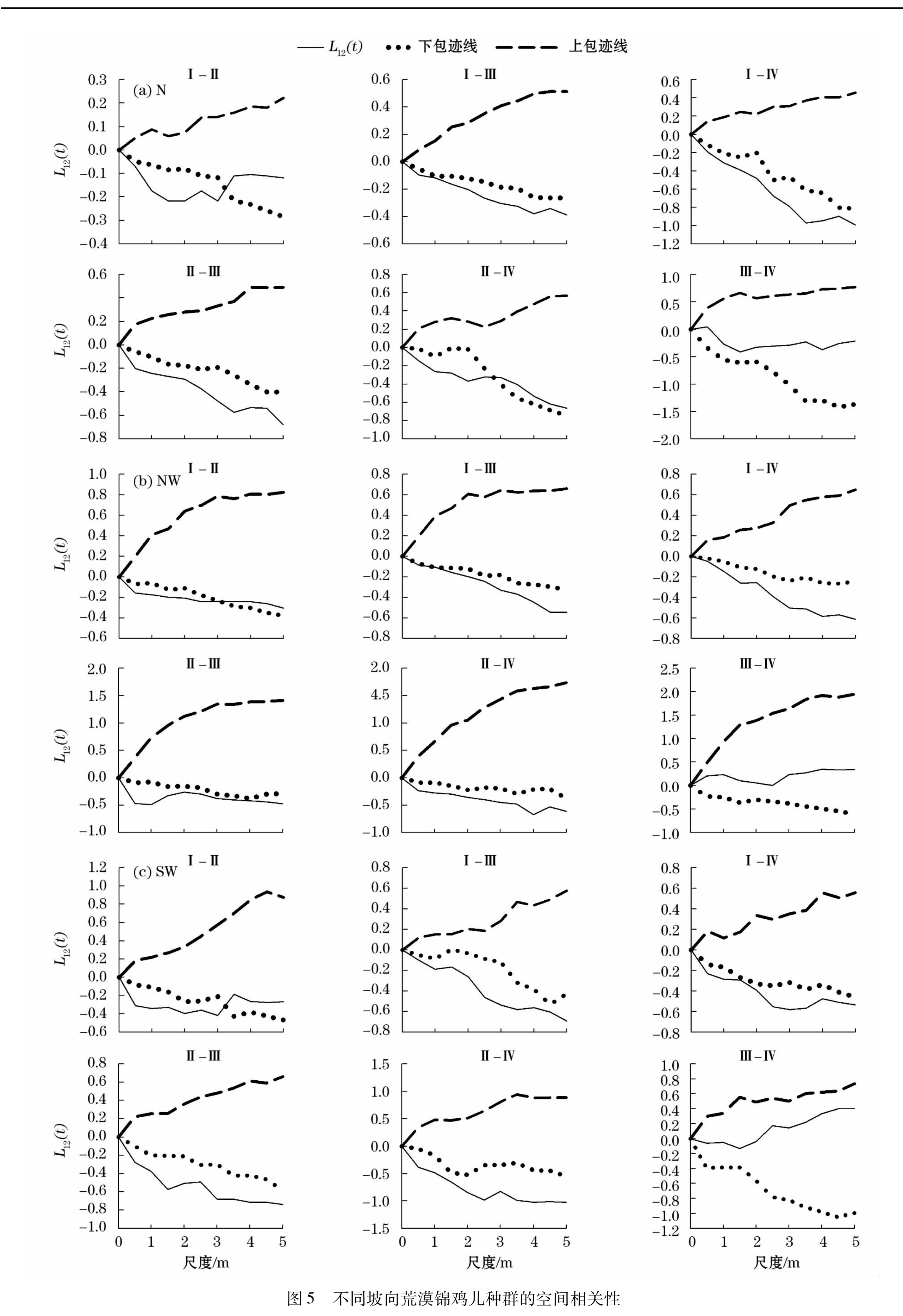


图5 不同坡向荒漠锦鸡儿种群的空间相关性

Fig. 5 Spatial correlation of *Caragana roborovskyi* population between different slope aspects

3 讨论

有研究表明,种群类型的结构特征不仅能够推测群落的发展变化趋势,而且能反映群落的更新类型[18]。种群个体的尺度大小和径级结构能够影响植物种群的空间分布格局,在某种程度上也能反映种群的生存状态[19]。本研究中,皋兰老虎台干旱荒漠区荒漠锦鸡儿种群Ⅰ、Ⅱ级数量最多,Ⅲ、Ⅳ级数量相对较少(图2),这表明幼龄与中龄的数量在整个种群中占绝对优势,冠幅的长与宽呈显著正相关,长与高呈先增加后逐渐趋于平缓的趋势(图3),整个种群属于增长型种群。

种群的空间分布格局与环境、自身的生态位和密度制约等生物学过程有关[20-22],这些能够揭示种群的发展趋势和动态变化[23]。生境的不同会影响物种的更新,尤其是处于幼龄阶段的物种对微生境变化比较敏感[24-25]。生境的异质性主要包括地形因子、光照度及土壤等的不同[26-27]。刘旻霞[7]以青藏高原高寒草甸的金露梅为例,分析了不同龄级种群空间分布格局与微生境-坡向的关系,发现低龄级幼苗仅在少数适宜种子萌发的地段成苗,因此会形成聚集分布的格局。本研究结果显示,Ⅰ级荒漠锦鸡儿灌丛在北坡和西北坡任何尺度都呈聚集分布,随着龄级越大逐渐趋于随机分布(图4)。可能是因为北坡和西北坡的坡度相对平缓(平均20°左右),光照强度小,土壤含水量大,适合如:黄花角蒿(*Incarvillea lute*)、短花针茅(*Stipa breviflora*)、银灰旋花(*Convolvulus ammannii*)、细叶亚菊(*Ajania tenuifolia*)等大部分植物生存,因此,幼龄的荒漠锦鸡儿个体会选择抱团生长的方式来抵御种间竞争,这样种群内部会通过聚集分布形成群体效应,来增强种间竞争力,增强其在水源及养分资源相对丰富的北坡和西北坡生境中拓展,但随着荒漠锦鸡儿个体的年龄及种群密度的增加,为了获得充足的水分及养分,会导致种内及种间竞争增多,荒漠锦鸡儿除了受上述其他物种排斥外,也会因种内竞争发生自疏现象。西南坡的荒漠锦鸡儿灌丛任何龄级在各个尺度均表现为随机分布状态(图4)。这是因为南坡坡度较大(平均45 左右),水分稀缺且光照较强,不利于锦鸡儿的生长,锦鸡儿种群的少量分布主要源于北坡和西北坡种子的随机扩散。有研究[28]表明,母树的空间距离长短与其种子的存活率为负相关,西南坡的锦鸡儿个体存活率低,且光照和水分等的胁迫及其他物种红砂、狗尾草(*Setaria viridis*)及猪毛蒿(*Artemisia scoparia*)等的竞争,使锦鸡儿种群的生长被限制,植被分布稀疏,种群个体间距离较远,生长无明显规律性,因而在研究尺度内表现为随机分布。

荒漠锦鸡儿Ⅰ、Ⅱ级个体的聚集分布,可以提升它们在种群内与其他物种间的竞争能力,提高幼年个体的存活率,促进种群的更新和整个种群的成长。但随着植株不断的长大,内部资源很难维持所有幼龄个体的发育成熟,特别是大龄级植株对光因子和营养元素的竞争,种内竞争加大,必然会出现密度制约或自疏现象[29],种群最终趋于均匀或随机分布[30]。

种内关联可解释为同一物种不同龄级在空间分布上的相互关联性,其能够反映出种群的现状和种群内的相互关系[31]。种群的空间关联性受其年龄、个体大小影响较大,龄级差别越大,其植株间正相关性就越弱,有时表现为负相关[32]。所以,龄级接近的个体,有时候更有利于种群的协调发展,而大龄级植株可能会对幼龄植株的生存产生胁迫,这也许与种内的强烈竞争有关。本研究结果表明,几乎在所有坡向,Ⅰ级和Ⅱ级、Ⅲ级以及Ⅳ级荒漠锦鸡儿种群在小尺度及其他尺度呈负相关(图5),究其原因是Ⅱ级、Ⅲ级和Ⅳ级荒漠锦鸡儿对Ⅰ级的更新有很强的抑制作用,种内竞争激烈,随着幼龄(Ⅰ级)抵御外界胁迫能力的增大,再加上它们对养分资源和空间资源的需求也相应增加,不同龄级个体间的竞争会不断加大[33];Ⅲ级和Ⅳ级荒漠锦鸡儿种群间无关联性,其相互独立,也可能是它们之间生长稀疏,彼此相隔有一定的距离,减轻了植株间对养分水分等资源的争夺,最终表现为无关联,这与刘旻霞[7]对高寒草甸不同龄级金露梅个体空间关联研究结果一致。

不同龄级的荒漠锦鸡儿在坡向梯度的分布规律揭示了黄土高原地区优势植物在自然演替中的生态学进程,同时不同空间格局与环境变化的关系阐释了荒漠锦鸡儿在黄土高原荒漠区的适应性。荒漠锦鸡儿不同斑块的分布不仅受种子扩散和生境异质性的影响,而且不同的环境因子和一定的环境胁迫也会对其分布起重要的作用。对于生态恢复来说,我国西北地区的生态恢复应多种植保育一些耐干旱、耐盐碱等抗性强的植被,以提高成活率;同时,植株间的株行距根据不同坡向及坡度的差异应在3~4 m为宜,待植被成活后可改变微环境,使其相互庇

护,提高抗干旱、高温和盐碱等环境胁迫的能力。

参考文献(References):

〔1〕 Hestenes M R,Stiefel E. Methods of conjugate gradients for solving linear systems〔J〕. Journal of Research of the National Bareau of Standards,1952,49(6):409 – 436.

〔2〕 Fletcher L,Reeves C M. Function minimization by conjugate gradients〔J〕. Computer Journal,1964,7(2):149 – 154.

〔3〕 Skoglund J,Verwijst T. Age structure of woody species population in relation to seed rain,germination and establishment along the river Dalalven,Sweden〔J〕. Vegetatio,1989,82(1):25 – 34.

〔4〕 Greig P,Smith P G,Anderson J A,et al. Quantitative Plant Ecology〔M〕. London:Blackwell Scientific,1983.

〔5〕 张璞进,清华,张雷,等. 内蒙古灌丛化草原毛刺锦鸡儿种群结构和空间分布格局〔J〕. 植物生态学报,2017,41(2):165 – 174.〔Zhang Pujin,Qing Hua,Zhang Lei,et al. Population structure and spatial pattern of *Caragana tibetica* communities in Inner Mongolia shrub-encroached grassland〔J〕. Chinese Journal of Plant Ecology,2017,41(2):165 – 174.〕

〔6〕 梅军林,庄枫红,马姜明,等. 桂林喀斯特地区克隆生长红背山麻杆种群的点格局分析〔J〕. 生态学报,2017,37(9):3 164 – 3 171.〔Mei Junlin,Zhuang Fenghong,Ma Jiangming,et al. Spatial point pattern analysis of *Alchornea trewioides* population clonal growth in the karst area of Guilin〔J〕. Acta Ecologica Sinica,2017,37(9):3 164 – 3 171.〕

〔7〕 刘旻霞. 亚高寒草甸不同坡向金露梅种群的空间分布格局及空间关联〔J〕. 应用生态学报,2017,28(6):1 817 – 1 823.〔Liu Minxia. Spatial distribution and spatial association of *Potentilla fruticosa* populations on different slope aspects in subalpine meadow〔J〕. Chinese Journal of Applied Ecology,2017,28(6):1 817 – 1 823.〕

〔8〕 Wezel A,Rajot J L,Herbrig C. Influence of shrubs on soil characteristics and their function in Sahelian agro-ecosystems in semi-arid Niger〔J〕. Journal of Arid Environments,2000,44(4):383 – 398.

〔9〕 李蒙蒙,刘丹,刘玉冰. 基于叶片微形态结构评价 10 种锦鸡儿属(*Caragana*)植物的抗旱特征〔J〕. 中国沙漠,2016,36(3):708 – 717.〔Li Mengmeng,Liu Dan,Liu Yubing. Evaluation on drought-resistant characteristics of ten *Caragana* species based on leaf micromorphological structure〔J〕. Journal of Desert Research,2016,36(3):708 – 717.〕

〔10〕 解李娜,魏亚冉,马成仓,等. 内蒙古高原西部荒漠区锦鸡儿属植物水力结构的变化〔J〕. 生态学报,2015,35(6):1 672 – 1 678.〔Xie Lina,Wei Yaran,Ma Chengcang,et al. Variation in hydraulic architecture of four *Caragana* species in the desert region on the Inner Mongolian Plateau〔J〕. Acta Ecologica Sinica,2015,35(6):1 672 – 1 678.〕

〔11〕 章尧想,刘芳,段娜,等. 4 种锦鸡儿属(*Caragana*)植物抗旱性研究〔J〕. 中国农学通报,2014,30(19):25 – 29.〔Zhang Yaoxiang,Liu Fang,Duan Na,et al. Study on drought resistance of 4 species of *Caragana*〔J〕. Chinese Agricultural Science Bulletin,2014,30(19):25 – 29.〕

〔12〕 宋彬. 不同变温、盐分及水分条件对新疆四种锦鸡儿属植物种子萌发及幼苗的影响〔D〕. 乌鲁木齐:新疆农业大学,2011.〔Song Bing. Influence of Varied Temperature,Salinity and Moisture on Seed Germination and Seedling Growth of Four Species of Four Species of *Caragana* L.〔D〕. Urumqi:Xinjiang Agricultural University,2011.〕

〔13〕 Ramiro Pablo López,Sergio Valdivia,Ninel Sanjinés,et al. The role of nurse plants in the establishment of shrub seedlings in the semi-arid subtropical Andes〔J〕. Oecologia,2007,152(4):779 – 790.

〔14〕 Reynolds J F,Virginia R A,Kemp P R,et al. Impact of drought on desert shrubs:Effects of seasonality and degree of resource island development〔J〕. Ecological Monographs,1999,69(1):69 – 106.

〔15〕 Wiegand T,Milton S J,Esler K J,et al. Live fast,die young:Estimating size-age relations and mortality pattern of shrubs species in the semi-arid Karoo,South Africa〔J〕. Plant Ecology,2000,150(1/2):115 – 131.

〔16〕 Ripley B D. Modelling spatial patterns〔J〕. Journal of the Royal Statistical Society,1977,39(2):172 – 212.

〔17〕 Gay L,He F L. Spatial point-pattern analysis for detecting density-dependent competition in a boreal chronosequence of Alberta〔J〕. Forest Ecology and Management,2009,259(1):98 – 106.

〔18〕 达良俊,杨永川,宋永昌. 浙江天童国家森林公园常绿阔叶林主要组成种的种群结构及更新类型〔J〕. 植物生态学报,2004,28(3):376 – 384.〔Da Liangjun,Yang Yongchuan,Song Yongchang. Population structure and regeneration types of dominant species in an evergreen broadleaved forest in tiantong national forest park,Zhejian Province,Eastern China〔J〕. Chinese Journal of Plant Ecology,2004,28(3):376 – 384.〕

〔19〕 Lan G,Getzin S,Wiegand T,et al. Spatial distribution and interspecific associations of tree species in a tropical seasonal rain forest of China〔J〕. Plos One,2012,7(9):e46074.

〔20〕 Condit R,Ashton P S,Baker P,et al. Spatial patterns in the distribution of tropical tree species〔J〕. Science,2000,288(5 470):1 414 – 1 418.

〔21〕 Crawley M J,Whitmore T C. Plant Ecology:Blackwell scientific publications〔J〕. Journal of Tropical Ecology,1987,3(2):496.

〔22〕 Cheng X,Han H,Kang F,et al. Point pattern analysis of different life stages of *Quercus liaotungensis* in Lingkong Mountain,Shanxi Province,China〔J〕. Journal of Plant Interactions,2014,9(1):233 – 240.

〔23〕 Wu Xiaopu,Zheng Yu,Ma Keping. Population distribution and dynamics of *Quercus liaotungensis*,*Fraxinus rhynchophylla* and *Acer mono* in Dongling Mountain,Beijing〔J〕. Acta Botanica Sinica,2002,44(2):212 – 223.

〔24〕 Veblen T T. Tree regeneration response to gaps along a Transandean gradient〔J〕 Ecology,1989,70(3):541 – 543.

〔25〕 Gray A N,Spies T A. Microsite controls on tree seedling establishment in conifer forest canopy gaps〔J〕. Ecology,1997,78(8):2 458 – 2 473.

〔26〕 王巍,李庆康,马克平. 东灵山地区辽东栎幼苗的建立和空间分布〔J〕. 植物生态学报,2000,24(5):595 – 600.〔Wang Wei,Li Qingkang,Ma Keping. Establishment and spatial distribution of *Quercus liaotungensis* Koids. seedlings in Dongling Mountain〔J〕. Chinese Journal of Plant Ecology,2000,24(5):595 – 600.〕

〔27〕 宗国,白雪娇,张淑媛,等. 辽东山区次生林乔木幼苗分布格局

与种间空间关联性〔J〕. 应用生态学报,2018,29(1):18 – 24. 〔Zong Guo, Bai Xuejiao, Zhang Shuyuan, et al. Spatial pattern and interspecific spatial association of tree seedlings in a secondary forest in montane region of eastern Liaoning Province, China〔J〕. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(1):18 – 24.〕

〔28〕马小丽,赵成章,张茜,等. 退化草地甘肃臭草和冷蒿种群空间格局及关联性〔J〕. 生态学杂志,2013,32(2):299 – 304.〔Ma Xiaoli, Zhao Chengzhang, Zhang Qian, et al. Spatial pattern and spatial association of *Melica przewalskyi* and *Artemisia frigida* in degraded grassland〔J〕. Chinese Journal of Ecology, 2013, 32(2):299 – 304.〕

〔29〕Raventos J, Wiegand T, De L M. Evidence for the spatial segregation hypothesis: A test with nine-ear survivorship data in a Mediterranean shrubland〔J〕. Ecology, 2010, 91(7):2 110 – 2 120.

〔30〕闫海冰,韩有志,杨秀清,等. 华北山地典型天然次生林群落的树种空间分布格局及其关联性〔J〕. 生态学报,2010,30(9):2 311 – 2 321.〔Yan Haibing, Han Youzhi, Yang Xiuqing, et al. Spatial distribution patterns and associations of tree species in typical natural secondary mountain forest communities of Northern China〔J〕. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(9):2 311 – 2 321.〕

〔31〕王磊,孙启武,郝朝运,等. 皖南山区南方红豆杉种群不同龄级立木的点格局分析〔J〕. 应用生态学报,2010,21(2):272 – 278.〔Wang Lei, Sun Qiwu, Hao Chaoyun, et al. Point pattern analysis of different ageclass *Taxus chinensis* var. *mairei* individuals in mountainous area of Southern Anhui Province〔J〕. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(2):272 – 278.〕

〔32〕尤海舟,刘兴良,缪宁,等. 川滇高山栎种群不同海拔空间格局的尺度效应及个体间空间关联〔J〕. 生态学报,2010,30(15):4 004 – 4 011.〔You Haizhou, Liu Xingliang, Miao Ning, et al. Individual association and scale effect of spatial pattern of *Quercus aquifolioides* populations along the elevation gradients〔J〕. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(15):4 004 – 4 011.〕

〔33〕宋于洋,李园园,张文辉. 梭梭种群不同发育阶段的空间格局与关联性分析〔J〕. 生态学报,2010,30(16):4 317 – 4 327.〔Song Yuyang, Li Yuanyuan, Zhang Wenghui. Analysis of spatial pattern and spatial association of *Haloxylon ammodendron* population in different developmental stages〔J〕. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(16):4 317 – 4 327.〕

Distribution Pattern of *Caragana roborovskyi* Population Based on Ripley's *K*(*r*) Function

LIU Min-xia, XIA Su-juan, NAN Xiao-ning, LI Quan-di, JIANG Xiao-xuan

(*College of Geographical and Environmental Sciences, Northwest Normal University, Lanzhou* 730070, *Gansu, China*)

Abstract: The spatial pattern and correlation of *Caragana roborovskyi* at different age levels on different slope aspects in Gaolan County, central Gansu Province was analyzed by using the Ripley *K* function in the point pattern analysis. The results showed that the *C. roborovskyi* population in class I and II was dominant in the whole population, and the population regeneration was good. The *C. roborovskyi* population in class I was clustered in the whole study scale, and that in class II, III and IV was distributed randomly on north slope. On the northwest slope, the population in class I was distributed in an obvious aggregation, that in class II was mostly in a small-scale aggregation and in a random large-scale aggregation, and that in class III and IV was randomly in any-scale aggregations. On the southwest slope, all the age classes of *C. roborovskyi* were distributed randomly on all scales. On different slopes, the population in class I and II was negatively correlated on the small scale, and it was unrelated with the increase of scale. The population in class III and IV was not related on any scales. In addition, the population at all other age levels was negatively correlated. The population regeneration of *C. roborovskyi* was not only affected by interspecific and intraspecific competition, but also related to the habitat conditions at different slope aspects. When *C. roborovskyi* was used to restore and rebuild the soil erosion area in central Gansu Province, the 4 m line spacing between shrubs was suitable on southwest and south slopes, and 3 m one was suitable on northwest and the north slopes.

Key words: slope aspect; *Caragana roborovskyi*; population; spatial pattern; correlation; central Gansu Province